

좁은밴드모델을 이용한 실린더 내의 비회색 가스 복사열전달 연구

박원희* · 정현성** · 김태국†
(2001년 11월 30일 접수, 2002년 3월 13일 심사완료)

Study on Nongray Gas Radiation within a Cylindrical Enclosure by Using the Narrow Band Model

Won-Hee Park, Hyun-Sung Jung and Tae-Kuk Kim

Key Words: Radiative Transfer(복사열전달), Nongray Gas (비회색가스), Ray-Tracing Method(복사선추적법), Narrow Band Model(좁은밴드 모델)

Abstract

Radiative transfer in energy systems such as furnaces, combustors, boilers and high temperature machineries is a significant mode of heat transfer. Although there are many solution schemes suggested for analysis of radiative transfer in multi-dimensional systems, the applicabilities and accuracies of these schemes have not fully tested for nongray gases. Especially reference data for enclosures of non-orthogonal shapes are not yet enough. In this paper we present some precise radiative transfer solutions for a black walled 3-dimensional cylindrical system filled with nongray gases. The SNB(statistical narrow band) model and the ray-tracing method with the T_N quadrature set are used for finding nongray solutions. Although the solution method used in this study is not suitable for engineering purposes, the resulting solutions are proved to be quite accurate and can be regarded as the exact solutions and the results presented in this paper can be used in developing various solution schemes for radiative transfer by real gas mixtures.

기호설명

a : 흡수계수 [m^{-1}]
 D : 실린더의 지름 [m]
 F : 흑체분율
 G : 평균복사강도 [$W/(m^2 \cdot sr)$]
 I_λ : 단파장복사강도 [$W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$]
 K : 좁은밴드의 밴드수
 L : 시스템 높이 [m]
 M : 각도수

N : quadrature set의 차수
 p : 계산점
 r : r 방향 좌표 [m]
 z : z 방향 좌표 [m]
 w_m : m^{th} 방향에 대한 각가중치

그리스문자

μ, ξ, η : 방향코사인
 $\Delta\lambda_i$: i^{th} 밴드의 두께 [μm]
 Δs_m : m^{th} 방향에 대한 복사선의 길이 [m]
 σ : Stefan-Boltzmann 상수
 τ : 투과율

† 중앙대학교 기계공학부
 E-mail : kimtk@cau.ac.kr
 TEL : (02)820-5282 FAX : (02)814-9476

* 중앙대학교 대학원
 ** 중앙대학교 대학원
 (현 한양대학교 대학원)

Ω : 방향

하첨자

b : 흑체

g : 가스

i : i^{th} 밴드

L : 밴드의 하한

p : 계산위치

u : 상류점

U : 밴드의 상한

$w, 1$: 측면벽 1

$w, 2$: 측면벽 2

λ : 단파장

상첨자

* : 무차원

- : 밴드평균

1. 서론

산업용 노, 연소기, 보일러 등은 고온에서 작동되는 시스템으로서 복사열전달은 전체 열전달에서 중요한 부분을 차지한다. 이러한 복사열전달을 해석하는 방법에는 여러 가지가 있으며, 직교격자를 이용하는 방법으로는 Zone method,⁽¹⁾ Monte Carlo method,⁽²⁾ P_N method,⁽³⁾ Flux method⁽⁴⁾와 구분중좌법⁽⁵⁻⁷⁾ 등이 있으며, 비직교격자계를 고려할 수 있는 방법으로는 유한체적법(FVM)^(8,9)과 구분중좌보간법(DOIM)⁽¹⁰⁻¹²⁾ 등이 있다. 가스에 의한 복사열전달은 파장에 따라 흡수 특성이 심하게 변화하는 비회색 특성을 가지며, 가스 성분과 온도에 따라 상이한 흡수특성으로 인해 해석의 어려움을 더 하고 있다. 다차원 복사열전달을 해석하는 많은 방법들이 제안되고 있으나, 비회색가스를 고려한 해석 결과들은 그 정확성을 충분히 검증받지 못하고 있는 실정이다. 이것은 비교할 만한 비회색 가스복사에 대한 엄밀해가 제시되어 있지 않는 것이 원인이라 할 수 있다. 최근에는 온도와 성분이 일정한 3차원 정육면체 내에서 회색 가스 및 비회색가스

의 엄밀 해석된 결과⁽²³⁾가 발표된 바 있다.

복사물성을 구하는 방법에는 복사열전달방정식(RTE, radiative transfer equation)에 직접 적용 가능한 흡수계수(absorption coefficient)를 구하는 방법과 통과율(transmissivity)을 구하는 방법으로 크게 나뉘어진다. 흡수계수를 모델링하는 방법은 회색 가스 가중합법(Weighted sum of gray gas model, WSGGM)^(13,14)과 흡수계수분포(k -distribution)⁽¹⁵⁾법, 흡수선 회색가스 가중합법(Spectral Line Weighted Sum of Gray Gases, SLW),^(16,17) 선별계산(Line-By-Line)^(18,19)법 등이 있으며, 통과율은 좁은밴드 모델(Narrow Band model)^(20,21)과 넓은밴드 모델(Wide Band model)⁽²²⁾ 등으로 구해질 수 있다.

이 중 가장 높은 정확도의 흡수 특성을 고려할 수 있는 선별법은 복사에너지 전달에 관계하는 모든 흡수선을 고려하여 계산하므로 복사물성치를 고려하는데 있어서 가장 높은 정확도를 가지고 있으나, 계산량이 너무 방대하므로 다차원의 복사열전달 계산에서는 사용되기 어렵다. 계산량과 정확도 면을 고려할 때 다차원의 복사열전달 계산에 있어서 좁은밴드 모델을 이용하여 구한 값은 엄밀한 해로서 인정받기에 충분하다.

그러므로 본 연구에서는 복사 물성치인 통과율은 좁은밴드 모델을 이용하여 구하였으며, T_N quadrature set⁽²⁴⁾을 채용한 각도구분법(Discrete Transfer Method)의 일종인 복사선 추적법(Ray-tracing method)⁽²⁵⁾을 이용하여 온도와 성분이 일정한 순수하게 흡수하는 비회색 가스로 충만되어 있는 흑체벽을 가진 실린더 내에서의 복사열전달을 해석하였다.

2. 지배방정식 및 수치해법

2.1 복사열전달 방정식

Fig. 1은 산란하지 않고 흡수 및 방출하는 참여 매체 내에서 임의의 방향 Ω 를 따라 s_u 로부터 s_b 로 전달되는 복사선을 도식적으로 표현한 그림으로, 이것을 참조하면 복사에너지는 다음과 같이 적분된 형

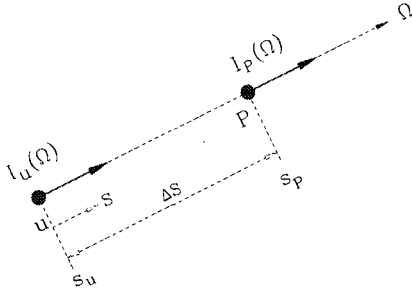


Fig. 1 Radiative intensity along a path

태의 복사열전달방정식(RTE)으로 표현될 수 있다.

$$I_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = I_{\lambda,u}(s_u, \Omega) e^{-\int_{s_u}^{s_p} a_{\lambda} ds} + \int_{s_u}^{s_p} a_{\lambda} I_{\lambda_b}(s) \cdot e^{-\int_s^{s_p} a_{\lambda}(s') ds'} ds \quad (1)$$

여기서, a_{λ} 는 흡수계수 I_{λ_b} 는 위치 s 에서의 흑체복사강도이다.

s_u 에서 s_p 까지의 통과율(transmittance)은 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{\lambda, s_u \rightarrow s_p} = e^{-\int_{s_u}^{s_p} a_{\lambda}(s) ds} \quad (2)$$

통과율을 이용하여 나타내면 식 (1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = I_{\lambda}(s_u, \Omega) \tau_{\lambda, s_u \rightarrow s_p} + \int_{s_u}^{s_p} a_{\lambda}(s) I_{\lambda_b}(s) \tau_{\lambda, s \rightarrow s_p} ds \quad (3)$$

식 (3)은 흑체복사강도가 일정하다고 가정할 수 있는 좁은 밴드 구간 내에서 평균하여 나타낼 수 있다. 파장에 대한 평균을 취하기 위한 파장 범위는 $\lambda_L = \lambda - \Delta\lambda/2$ 와 $\lambda_U = \lambda + \Delta\lambda/2$ 로 고려하고 있으며, $\Delta\lambda$ 는 좁은밴드모델(narrow band model)의 밴드 두께를 나타낸다. 표현을 간결하게 하기 위하여 밴드 내의 평균값은 변수위에 선을 그어 나타내었으며, 복사강도의 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{I}_{\lambda} = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_L}^{\lambda_U} I_{\lambda} d\lambda \quad (4)$$

따라서 식 (3)은 다음과 같이 평균된 형태로 나타낼 수 있다.

$$\bar{I}_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = \bar{I}_{\lambda,u}(s_u, \Omega) \tau_{\lambda, s_u \rightarrow s_p} + \int_{s_u}^{s_p} \bar{a}_{\lambda}(s) \bar{I}_{\lambda_b}(s) \tau_{\lambda, s \rightarrow s_p} ds \quad (5)$$

여기서, 통과율은 대부분의 가스에서 파장에 따라 심하게 변하며, 이것이 파장에 따라 심하게 변하는 다른 변수와 곱해진 상태로 파장에 대하여 평균할 때 주의를 기울여야 한다.⁽²⁶⁾ 반면에 좁은 밴드 구간 내에서 흑체의 복사강도는 거의 일정하다고 가정할 수 있으므로 흑체 복사강도와 통과율 사이의 상관관계는 무시할 수가 있다.^(27,28) 본 연구에서 고려하는 모든 벽이 흑체이므로 식 (5)의 상류점 s_u 위의 복사강도는 $I_{\lambda,u} = I_{\lambda,bw}$ 가 되며, 따라서 식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{I}_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = \bar{I}_{\lambda,bw}(s_u, \Omega) \cdot \tau_{\lambda, s_u \rightarrow s_p} + \int_{s_u}^{s_p} \bar{a}_{\lambda}(s) \tau_{\lambda, s \rightarrow s_p} \cdot \bar{I}_{\lambda_b}(s) ds \quad (6)$$

시스템 내에서 매체의 온도와 성분이 일정한 것으로 가정하고 있으므로 식 (6)의 오른쪽 적분항은 위치 s 에 대하여 무관하며 다음과 같이 정리할 수가 있다.

$$\bar{I}_{\lambda,p}(s_p, \Omega) = \bar{I}_{\lambda_b} + [\bar{I}_{\lambda,bw}(s_u, \Omega) - \bar{I}_{\lambda_b}] \bar{\tau}_{\lambda}(\Delta s) \quad (7)$$

여기서 Δs 는 s_u 에서 s_p 까지의 거리를 나타내며, 통과율 $\tau_{\lambda, s_u \rightarrow s_p}$ 는 매체의 온도 및 성분이 일정한 경우 경로 길이 Δs 에 의해서 결정되므로 $\bar{\tau}_{\lambda}(\Delta s)$ 로 나타낼 수 있다.

p 점에서 λ_L 과 λ_U 사이에서 평균된 복사강도 $\bar{I}_{\lambda,p}$ 는 흑체분율(blackbody fraction)을 이용

하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{I}_{\lambda, p}(s_p, \Omega) = \frac{\sigma T_g^4}{\pi \Delta \lambda} F_{T_g^{\lambda_L} - T_g^{\lambda_U}} \quad (8)$$

$$+ \sigma [T_w^4 F_{T_g^{\lambda_L} - T_g^{\lambda_U}} - T_g^4 F_{T_g^{\lambda_L} - T_g^{\lambda_U}}] \frac{\bar{\tau}_\lambda(\Delta s)}{\pi \Delta \lambda}$$

여기서, 흑체분율 $F_{T_g^{\lambda_L} - T_g^{\lambda_U}}$ 는 좁은 밴드 내에서 다음과 같이 정의되는 값이다.

$$F_{T_g^{\lambda_L} - T_g^{\lambda_U}} = \int_{\lambda_L}^{\lambda_U} \frac{\pi I_{\lambda b}}{\sigma T_g^4} d\lambda \quad (9)$$

Ω_m 방향으로 향하는 시선에서 i 번째 밴드 내의 복사강도는 다음과 같이 차별화된 식으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{I}_{i, p, m} = \frac{\sigma T_g^4}{\pi \Delta \lambda_i} F_{T_g^{\lambda_{k,L}} - T_g^{\lambda_{k,U}}} \quad (10)$$

$$+ \sigma [T_w^4 F_{T_g^{\lambda_{k,L}} - T_g^{\lambda_{k,U}}} - T_g^4 F_{T_g^{\lambda_{k,L}} - T_g^{\lambda_{k,U}}}] \frac{\bar{\tau}_k(\Delta s_m)}{\pi \Delta \lambda_i}$$

식 (10)을 이용하여 시선(line of sight)을 따라 전달되는 과정을 추적하는 복사선 추적법(Ray-tracing method)⁽²⁵⁾에 의하여 위치 p 에 입사되는 모든 방향으로의 복사강도를 구할 수 있으며, 총괄복사강도는 식 (10)에서 구한 좁은 밴드 내의 평균된 복사강도를 모든 밴드에 대한 합을 취함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{p, m} = \sum_{i=1}^K \bar{I}_{i, p, m} \Delta \lambda_i \quad (11)$$

2.2 좁은 밴드 모델

온도와 성분이 균일한 매체 내에서 경로 Δs 에서의 통과율은 좁은 밴드 구간에서 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.⁽²⁹⁾

$$\bar{\tau}(\Delta s) = \exp \left[-\frac{\beta_\nu}{\pi} \left(\sqrt{1 + \frac{2\pi f p \Delta s k_\nu}{\beta_\nu}} \right) \right] \quad (12)$$

여기서, \bar{k}_ν , β_ν 는 각각 밴드 내의 평균 흡수 계수와 흡수선의 중복을 나타내는 인자(line overlap parameter)를 나타낸다.⁽³⁰⁾ 이 데이터들은 150-

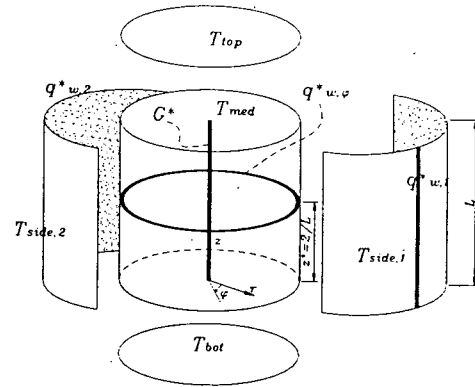


Fig. 2 Schematic drawing of the cylindrical enclosure

9300cm⁻¹ 구간의 파장 범위에서 25cm⁻¹의 밴드간격으로 주어져 있으며, 300-2900K까지의 온도영역에서 이용할 수 있도록 되어있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해석 모델 및 조건

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 4개로 구분된 등온 벽(윗벽, 아랫벽, 측면 벽 2개)으로 구성된 지름 D 와 높이 L 인 실린더를 고려하였으며, 크기는 각각 1 m와 2 m로 하였다. 실린더의 아랫면 중심을 원점으로 하여 각각 $r^* = r/D$, $z^* = z/L$ 으로 나타내었다. 복사열유속과 평균복사강도는 각각 다음과 같이 계산될 수 있으며, 이 값들은 T_{max} 로 무차원화시켰다.

$$q_w^* = \frac{q_w}{\sigma T_{max}^4} \quad (13)$$

$$= \frac{1}{\sigma T_{max}^4} \sum_{m=1}^M I_{p, m} \eta_m w_m$$

$$G^* = \frac{\pi G}{\sigma T_{max}^4} \quad (14)$$

$$= \frac{1}{4\sigma T_{max}^4} \sum_{m=1}^M I_{p, m} w_m$$

이러한 계산은 Fig. 2에서와 같이 복사열유속의 경우 측면벽의 중심선($\varphi = 90^\circ$)을 따라 그리고

Table 1 Temperature for each case

	T_{top}	T_{bot}	$T_{side,1}$	$T_{side,2}$	T_{med}
조건 1	500	1000	700	500	500
조건 2	1000	1000	700	500	500

실린더의 중심단면($z^*=0.5$)에서 원주를 따라 계산되었다(q_w^*). 평균복사강도 G^* 는 z 축을 따라 매체의 중심을 통과하는 선을 따라 계산하였으며 실린더 중심($z^*=0.5$)에서 r 값에 따른 평균복사강도도 계산하였다. 복사열유속의 경우에 벽에서 매체로 향하는 방향을 양으로 설정하였다. 또한 실제 가스의 흡수특성을 알아보기 위하여 실린더 내에 이산화탄소와 수증기가 채워진 경우 및 혼합가스로 채워져 있는 경우를 각각 고려하였다. 참여매체로는 순수 H_2O , 순수 CO_2 와 H_2O 와 CO_2 가 2:8, 5:5의 비율로 혼합된 4가지의 가스이며 모든 경우에 전압은 1기압으로 설정하였으며, Table 1에 나타낸 바와 같이 상하 끝단의 벽 온도가 다른 경우 (조건 1)와 같은 경우 (조건 2)를 고려하여 복사열전달을 해석하였다.

우선 각도 구역의 개수에 따른 해의 의존성을 조사하기 위해 예비적인 계산을 수행하였다. Fig. 3은 전압이 1기압인 순수 CO_2 로 충전된 실린더(조건 1을 적용)를 고려하여 구분 각도수의 변화에 따른 계산된 무차원 평균 복사강도(G^*)의 변화를 나타내고 있다. Fig. 3에서 점선 및 실선과 원형 기호는 각각 T_N quadrature에서 차수가 $N=50, 60, 80$ 일 때의 해석결과를 각각 나타내며, $N=60$ 으로 부터 얻어진 결과는 그 이상의 구분각도수를 이용하여 얻은 결과($N=80$)와 0.14%의 오차로 거의 동일한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 ray effect에 의한 영향이 거의 나타나지 않는 각도구역 T_{60} 을 이용하기로 하였다. T_{60} 의 각도구역으로 계산할 경우 Pentium V 1.5GHz으로 약 2.5시간이 소요되었다.

본 논문의 결과들이 타당하다는 것을 검증하기 위하여 알려진 이론적 엄밀해와 비교하였다.

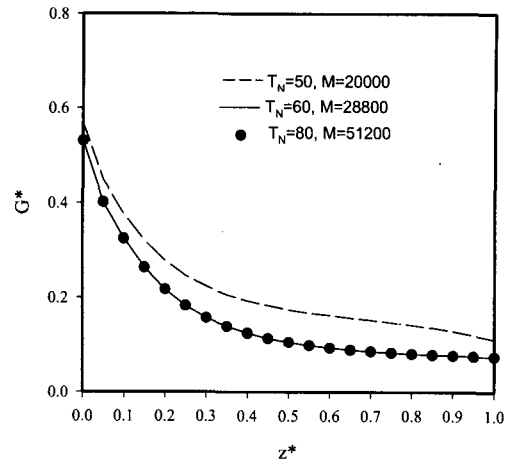


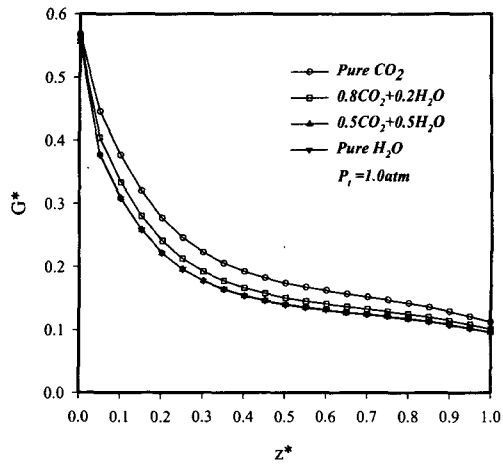
Fig. 3 Average intensity G^* for different numbers of directions

실린더의 아랫벽을 제외한 모든 벽과 매체가 같은 온도로 유지되고, 아랫벽만 고온으로 유지되어 있는 경우 아랫면 중심에서의 평균복사강도의 이론적 엄밀해는 0.53125이다(참고문헌 (23)참조). 본 논문에서 이용한 방법으로 계산하면 (매체는 이산화탄소로 가정) 아랫벽에서의 무차원 평균복사강도 값은 0.53099으로 0.049%의 오차를 나타내었으며, 이로써 계산결과가 타당하다는 것을 알 수 있다.

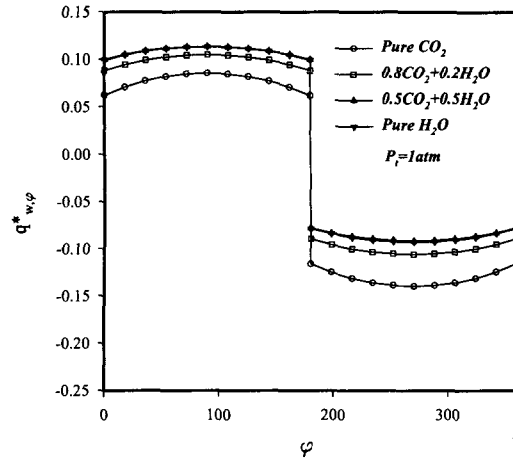
3.2 해석결과

Fig. 4는 $r^*=0$ 인 실린더 중심에서 z 축을 따라 계산된 무차원 평균 복사 강도를 나타내고 있다. Fig. 4의 (a)는 조건 1을 (b)는 조건 2를 고려한 계산 결과를 각각 나타내고 있다. 조건 1과 2 모두에서 매체가 순수한 이산화탄소로 가득 차 있을 경우 내부의 평균 복사강도 G^* 는 가장 큰 값을 가지며, 이산화탄소의 함량이 적어지고 수증기의 양이 많아질수록 평균복사강도 값이 작아짐을 알 수 있다. 이는 이산화탄소가 벽면에서 방출되는 복사 에너지를 수증기보다 더 적게 흡수하기 때문이다.

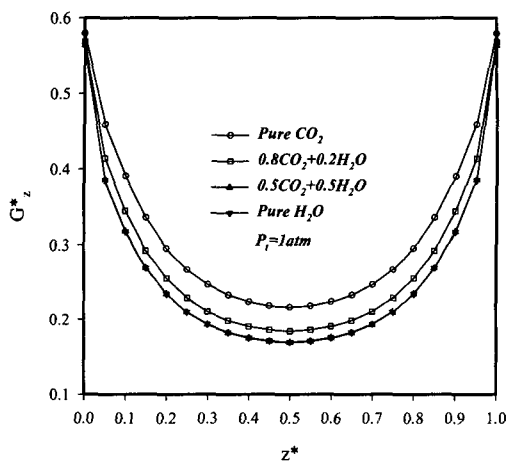
실린더의 중간 높이($z^*=0.5$)에서 원주방향으로의 복사열유속을 Fig. 5에 나타내고 있다.



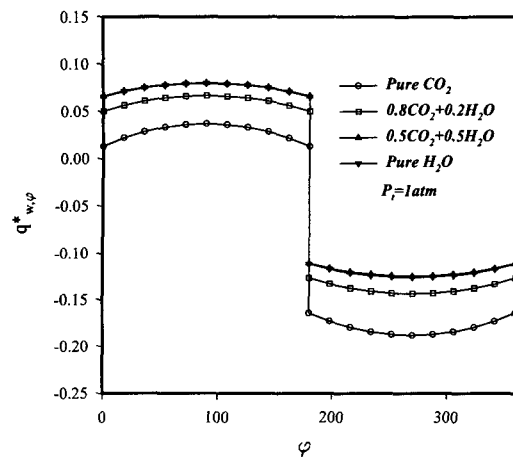
(a) 조건 1



(a) 조건 1



(b) 조건 2



(b) 조건 2

Fig. 4 Average intensity distributions along the axis line

Fig. 5 Net circumferential wall radiative heat fluxes on the center of cylinder ($z^* = 0.5$)

각도 0° 에서 180° 까지는 온도가 높은 측면벽 1 이고, 180° 에서 360° 까지는 온도가 낮은 측면벽 2를 나타낸다. 측면벽 1에서는 0° 및 360° 위치에서의 온도를 700K 로 가정하였으며 측면벽 2에서는 이들 지점에서의 온도를 500K 로 측면벽의 온도를 가정하여 계산하였다. 그러므로 0° 위치와 360° 위치에서의 측면벽의 온도가 불연속하므로 열유속값이 일치하지 않는다. 열유속값이 양으로 나타나고 있는 측면벽 1에서는 복사열 유속이 매체로 방출되고, 음의 열유속으로 나타나고 있는 측면벽 2의 경우에는 벽으로 복사열유

속이 유입되는 것을 의미하고 있다.

Fig. 6은 $\phi = 90^\circ$ 일 때 z^* 축에 따른 복사열 유속을 나타내고 있다. 조건 1의 경우 측면벽 1 하부의 벽에서는 고온벽의 영향으로 복사열유속이 영향으로 벽쪽으로 향하다가 측면벽보다 차가운 매체의 영향으로 상부벽에서는 복사에너지가 방출되는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서 언급되지 않은 실린더 중심($z^* = 0.5$)에서 r 값에 따른 평균복사강도 및 앞에서 제시한 계산 결과들을 인터넷 주소 <http://cau.ac.kr/~energy/published>

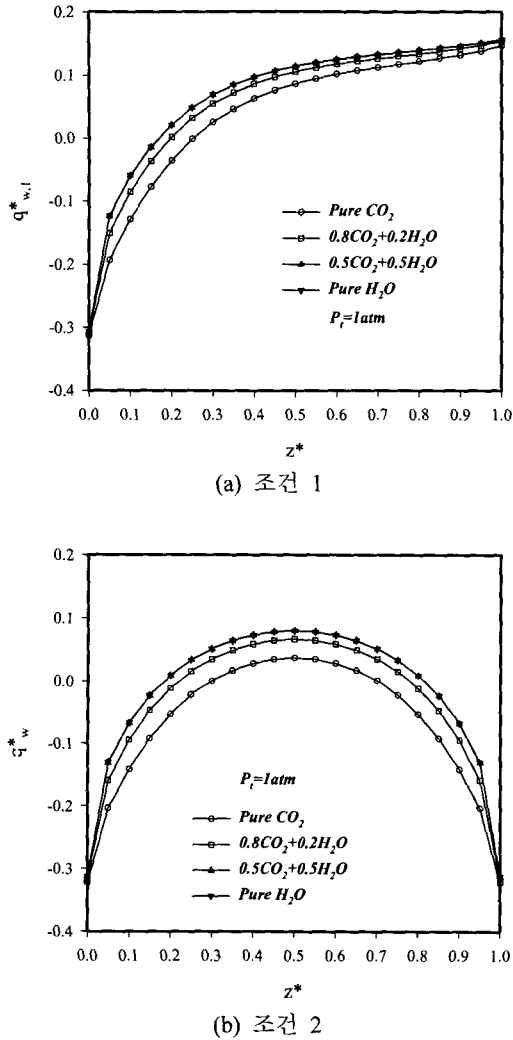


Fig. 6 Net radiative side wall heat fluxes ($\varphi=0^\circ$)

/cylinder_nongray2/data.html에 올려놓았다.

4. 결론

본 연구에서는 균일 농도 및 온도 분포를 갖는 비회색 가스로 충전된 흑체벽으로 구성된 실린더 내에서의 복사열전달에 대한 해를 구하였다. 복사선추적법이 이용되었으며, 각도구분 개

수의 의존성을 조사하여 충분한 정확도를 갖는 T_{60} quadrature set(28800개의 각도구역)를 이용하였다. 그리고 비회색가스의 특성은 좁은밴드 모델을 이용하여 해석하였다. 비회색가스의 특성을 규명하기 위하여 이산화탄소, 수증기 및 이들의 혼합가스를 매체로 고려하였으며, 여러 가지의 벽 및 매체온도를 고려하여 평균복사강도 및 복사열유속을 계산하여 매체 및 벽의 온도가 평균복사강도 및 복사열유속에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. 매체에 따른 상이한 복사열전달에 대한 특성을 해석한 결과 본 연구에서 주어진 조건에서는 매체의 종류에 따라 평균 복사강도 및 열유속값의 변화가 각각 0.05(무차원 기준) 및 0.06까지 달라질 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 고려한 방법을 이용하여 공학적 응용을 위한 해석을 하기에는 막대한 계산 시간이 소요되는 등의 어려움이 따른다. 하지만 본 연구에서 얻은 결과들은 높은 정확도를 가지고 있으며, 이러한 결과들은 다차원공간 내의 실제 가스에 의한 복사열전달을 해석하는 기법을 연구하는 기준자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원으로 설립된 연소기술연구센터(CERC)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Hottel, H.C. and Sarofim, A.F., 1967, *Radiative Transfer*, McGraw-Hill.
- (2) Howell, J.R. and Perlmutter, M., 1964, "Monte Carlo Solution of Thermal Transfer through Radiant Media Between Gray Walls," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 86, No. 1, pp. 116~122.
- (3) Menguc, M.P. and Viskanta, R., 1985, "Radiative Transfer In Three-Dimensional Rectangular Enclosures Containing Inhomogeneous, Anisotropically Scattering Media", *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*,

- Vol. 33, No. 6, pp. 533~549.
- (4) Lockwood, F.C. and Spalding, D.B., 1971, "Prediction of a Turbulent Duct Flow with Significant Radiation," *Proc. Thermodynamics Colloquium*.
- (5) Carlson, B.G. and Lathrop, K.D., 1968, "Transport Theory-The Method of Discrete Ordinates," Computing Methods in reactor physics, Greenspan, H., Kelber, C. N., and Okrent, D. eds., Gordon and breach, New York.
- (6) Fiveland, W.A., 1984, "Discrete-Ordinates Solutions of the Radiative Transport Equation for Rectangular Enclosures," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 699~706.
- (7) Kim, T.K. and Lee, H., 1988 "Effect of Anisotropic Scattering on Radiative Heat Transfer in Two-Dimensional Rectangular Enclosures," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, No. 8, pp. 1711~1721.
- (8) Raithby, G.D. and Chui, E.H., 1990, "A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosure with Participating Media," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 415~423.
- (9) Chai, J.C., Lee, H.S. and Patankar, S.V., 1994, "Treatment of Irregular Geometries Using a Cartesian Coordinates Finite-Volume Radiation Heat Transfer Procedure," *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 26., pp. 225~235.
- (10) Cheung, K.B. and Song, T.H. 1997, "Discrete Ordinates Interpolation Method for Numerical Solution of Two-Dimensional Radiative Transfer Problems," *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 32, pp. 107~125.
- (11) Seo, S.H. and Kim, T.K., 1998, "Study on interpolation schemes of the discrete ordinates interpolation method for 3-D Radiative Transfer with Nonorthogonal Grids," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 1091~1094.
- (12) Kim, T.K., Seo, S.H., Min, D.H. and Son, B.S., 1998, "Study on Radiation in 3-D Irregular Systems Using the Trapezoidal Rule Approximation on the Transport Equation," *KSME international Journal*, Vol. 12, No. 3, pp. 514~523.
- (13) Hotel, H.C., Sarofim A.F., 1967, *Radiative Transfer*, McGraw-Hill, New York
- (14) Modest, M.F., 1993, "The Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer," *ASME Journal of Heat Transfer*, vol 113, pp. 650~656.
- (15) Goody, R., West, R., Chen, L., Crisp, D., 1989, "The Correlated-k Method for Radiation Calculations in Nonhomogeneous Atmospheres," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 42, pp. 539~550.
- (16) Denison, M.K., Webb, B.W., 1993, "A Spectral Line-Based Weighted-Sum-of-Gray- Gases Model for Arbitrary RTE Solvers," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 1004~1012.
- (17) Denison, M.K., Webb, B.W., 1995, "The Spectral Line-Based Weighted-Sum-of-Gray- Gases Model in Nonisothermal Nonhomogeneous Media," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, pp.359~365.
- (18) Hartmann, J. M., Levi Di Leon, R., and Taine, J., 1984, "Line-by-Line and Narrow- Band Statistical Model Calculations for HO_2 ," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 32, pp.119~127.
- (19) Taine, J., 1983, "A Line-by-Line Calculation of Low Resolution Radiative Properties of $CO-CO$ Transparent Nonisothermal Gas Mixtures up to 3000K," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 30, No. 4, pp. 371~379.
- (20) Goody, R.M., 1952, "A Statistical Model for Water-Vapor Absorption," *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, Vol. 78, pp. 165~169.
- (21) Malkmus, W., 1967, "Random Lorentz Band Model with Exponential-tailed S^{-1} Line-Intensity Distribution Function," *J. Opt. Soc. Am.*, *ASME Journal of Heat Transfer* Vol. 57, pp. 323~329.
- (22) D.K. Edwards, A. Balakrishnan, 1973, "Thermal radiation by combustion gases," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, pp. 25~40.
- (23) Kim, T.K., Park, W.H. and Lee, C.H., 2001, "Radiative Transfer Solutions for Pure Absorbing

- Gray and Nongray Gases within a Cubical Enclosure," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 6, pp. 752~763.
- (24) Thurgood, C.P., Pollard, A. and Becker, H.A., 1995, "The T_N Quadrature Set for the Discrete Ordinates Method," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 1068~1070.
- (25) Lockwood, F.C. and Shah, N.G., 1981, "A New Radiation Solution Method for Incorporation in General Combustion Predictions Procedure", in *18th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, PA*, pp. 1405~1414.
- (26) Zhang, L., Soufiani, A. and Taine, J., 1988, "Spectral Correlated and Noncorrelated Radiative Transfer in a Finite Axisymmetric System Containing an Absorbing and Emitting Real Gas-Particle Mixture," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 2261~2272.
- (27) Soufiani, A. and Taine, J., 1989, "Experimental and Theoretical Studies of Combined Radiative and Convective Transfer in CO_2 and H_2O Laminar Flows," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, No. 3, pp. 447~486.
- (28) Kim, T.K., Menart, J.A. and Lee, H., 1991, "Nongray Radiative Gas Analyses Using the S-N Technique," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 946~952.
- (29) Ludwig, D.B., Malkmus W., Reardon J.E. and Thomson A.L., 1973, *Handbook of Infrared Radiation from combustion Gases*, NASA SP-3080
- (30) Soufiani A. and Taine J., 1997, "High temperature gas radiative property parameters of statistical narrow-band model for H_2O , CO_2 and CO , and correlated-K model for H_2O and CO_2 ," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 4, No.4 pp. 987~991.